

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду: Справочное пособие / Под ред. В.В. Алдушина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. – М.: АНКИЛ, 2000. – 600 с.
2. Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А. и др. Моделирование техногенных загрязнений при отделении ступеней ракет-носителей // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 11. – С. 5–9.
3. Немова Т.Н., Кузнецов Г.В., Мамонтов Т.Я., Бульба Е.Е. Численное моделирование состояния капель диметилгидразина при движении из верхних слоев атмосферы к поверхности Земли // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 6. – С. 112–115.
4. Долотов А.Е., Кузнецов Г.В., Немова Т.Н. Численное моделирование процесса испарения капель несимметричного диметилгидразина в атмосфере Земли // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 4. – С. 46–49.
5. Хирс Д., Паунд Г. Испарение и конденсация. – М.: Металлургия, 1966. – 196 с.
6. ГОСТ 24631-81. Государственный стандарт СССР. Атмосферы справочные. Параметры. Государственный комитет СССР по стандартам. Москва.
7. Большаков Г.Ф. Химия и технология компонентов жидкого топлива. – Л.: Химия, 1983. – 320 с., ил.

Поступила 15.10.2008 г.

УДК 536.468

## ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МАЗУТА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕГРУЗКИ, ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

А.В. Захаревич, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, В.Ф. Панин, Д.С. Равдин

Томский политехнический университет  
E-mail: elf@tpu.ru

Экспериментально установлена возможность зажигания мазута одиночной нагретой до высоких температур (1473 К) металлической частицей, определены зависимости времени задержки зажигания от начальной температуры частицы. Показано влияние структуры частиц (монолитные и пористые) на закономерности процесса зажигания мазута.

### Ключевые слова:

Пожарная опасность, время задержки зажигания, металлическая частица, жидкое топливо.

### Введение

Вещества или материалы, свойства которых каким-либо образом благоприятствуют возникновению или развитию пожара, относят к пожароопасным [1].

Разработка эффективных пожаро-профилактических мероприятий в теплоэнергетике и успешное тушение возникающих на тепловых электрических станциях пожаров в решающей степени зависят от правильности и полноты оценки пожарной опасности веществ, используемых в том или ином производстве. При оценке пожарной опасности всех веществ определяют их способность воспламеняться.

Одним из широко применяющихся на тепловых электрических станциях (ТЭС) топлив является мазут, свойства которого и эксплуатационные характеристики в ряде случаев достаточно нестабильны. Нестабильность проявляется в мазутопроводах и особенно в мазутохранилищах, как способность мазута постепенно образовывать на стенках смолистые и коксообразные отложения, трудно поддающиеся удалению. Свой вклад в нестабильность мазута вносит коагуляция асфальтосмолистых веществ, обусловленная тем, что мазут перекачивают и хранят на ТЭС в подогретом состоянии.

Характерными для теплоэнергетики являются процессы ремонта, повторяющиеся достаточно регулярно в связи со специфическими условиями работы основного и вспомогательного оборудования [2, 3]. Проведение ремонтных работ обычно сопровождается процессами резки и сварки металлов. Образующиеся при этом частицы металлов являются вероятными источниками зажигания мазута при его транспорте, хранении и перегрузке. До настоящего времени оценки пожарной опасности мазута в условиях проведения ремонтных работ в цехах ТЭС не проводилось.

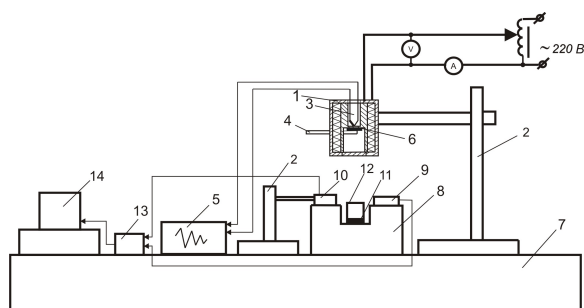
Целью работы является экспериментальное исследование закономерностей зажигания мазута одиночными нагретыми до высоких температур частицами металлов.

Основной характеристикой процесса зажигания веществ является время задержки зажигания  $\tau_{ind}$ . Поэтому функцией цели [4] в проведенных экспериментах было выбрано  $\tau_{ind}$ . Основными факторами, определяющими величину  $\tau_{ind}$  на основании анализа результатов теоретических исследований [5], можно считать значение начальной температуры частицы и её размеры. Основной проблемой является то, что частицы (часто капли) являются неправильными многогранниками или несимме-

тричными телами вращения. Поэтому целесообразны исследования с частицами различной формы. В этом случае можно сделать заключение о масштабах влияния формы частицы на параметры зажигания. Следует отметить, что теоретические исследования [5] показали, что форма частиц практически не влияет на условия зажигания конденсированных веществ при сохранении постоянной площади контакта источника зажигания и поверхности вещества.

### Методика исследования

При планировании эксперимента была выбрана наиболее типичная схема — частица падает перпендикулярно поверхности мазута с малой скоростью (менее 1,7 м/с). Принималось, что частица погружается в горючую жидкость не полностью. Моделировались условия разлива мазута по твердой поверхности.



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки: 1) нагревательный прибор; 2) штатив; 3) хромель-алюмелевая термопара; 4) керамический стержень; 5) устройство для измерения и контроля температуры УКТ38-Щ4-ТП; 6) металлическая частица; 7) рабочая поверхность экспериментальной установки; 8) огнестойкая площадка; 9) приемник излучения и регистратор пламени; 10) излучатель; 11) слой мазута; 12) стеклянный сосуд; 13) аналого-цифровой преобразователь; 14) персональный компьютер

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка (рис. 1), основными элементами которой являлись нагревательная печь и контрольно-измерительный блок [6]. Эксперименты проводились для частиц в форме диска, сферы и с частицами, остающимися после сварки с относительно одинаковыми площадями миделевого сечения. Металлическая частица падала в стеклянный вертикальный сосуд размером  $h=4 \cdot 10^{-2}$  м (высота) и  $d=5 \cdot 10^{-2}$  м (диаметр). Температура частицы ( $T_q$ ) существенно превышала начальную температуру мазута (300 К). Для обеспечения достоверности результатов измерений опыты проводились 3–5 раз подряд в одинаковых условиях. Нагрев металлического диска до заданной температуры осуществлялся в нагревательной печи, обеспечивающей стабильную температуру рабочего объема (до 1523 К) в течение продолжительного времени [6]. Нагретая частица падала с фиксированной высоты 0,15 м в жидкость. Моменты соприкосновения «горячей» стальной частицы с поверхностью жидко-

сти и появления пламени фиксировались фотоэлементом и цифровой видеокамерой. Время задержки зажигания  $\tau_{ind}$  определялось от момента контакта частицы с поверхностью мазута до момента появления пламени. Интервал между этими двумя моментами регистрировался на ПЭВМ и фиксировался видеокамерой с частотой 50 кадров в секунду, которая обеспечивала возможность детализации исследуемых механизмов и выделения достаточно тонких эффектов при многократном повторном анализе видеок кадров.

При проведении исследований обеспечивалась неизменность внешних условий. Все эксперименты проводились в закрытых отапливаемых помещениях при температуре воздуха 293...295 К. Также поддерживалось постоянной начальная температура мазута марки Т-100 [7].

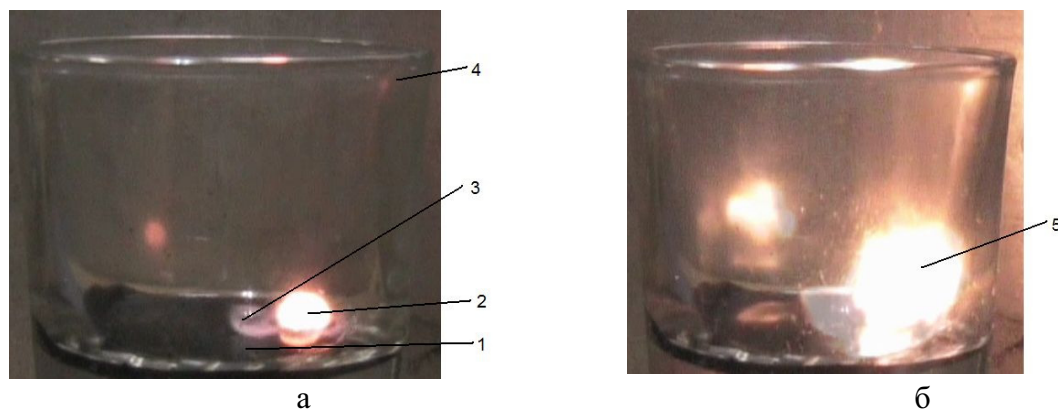
### Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам проведенных экспериментов предложена физическая модель процесса зажигания мазута. Мазут отличается от дистиллятных топлив тем, что не способен полностью испаряться. Процесс воспламенения мазута происходит до тех пор, пока в нем присутствуют фракции, способные превращаться в пар. По мере отделения высокотемпературных фракций возрастает температура остающейся части мазута, и начинается термическое разложение остатка. Масса нелетучего остатка мазута весьма значительна и составляет 60...80 % от начальной массы [7]. Поэтому именно горением неиспаряющейся части мазута в основном определяются продолжительность и полнота сгорания этого топлива в топках котлов ТЭС.

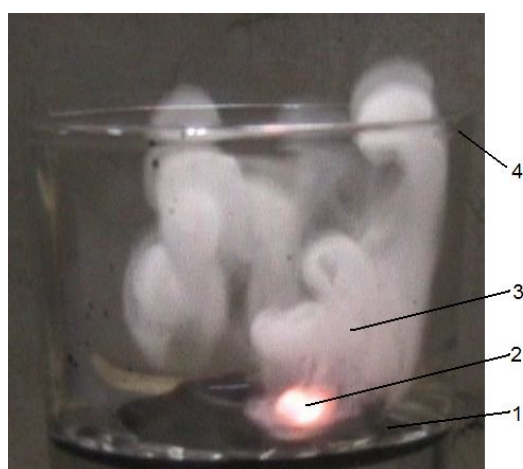
Установлено, что в проведенных экспериментах металлическая частица — сфера ( $d=6 \cdot 10^{-3}$  м), погрузившись в мазут, нагревала его и инициировала процесс интенсивного парообразования, рис. 2, а. Далее происходило воспламенение паров, рис. 2, б. Установлено, что зажигание паров характерно на небольшом расстоянии от поверхности мазута. В дальнейшем имело место горение паров легких фракций мазута.

Стабильное зажигание происходило при температуре  $T_q > 1313$  К. Ниже этой температуры зажигания мазута не зафиксировано, рис. 3.

На рис. 4 приведены типичные результаты экспериментов по определению времени задержки зажигания мазута одиночными нагретыми частицами в форме сферы, диска и образовавшимися при сварке. Пористая частица была соизмерима по миделеву сечению с частицей в форме сферы. Погрешность величины времени задержки зажигания при постоянной температуре частицы составляла не более 12 %. При дальнейшем увеличении начальной температуры частицы рассеяние экспериментальных данных существенно уменьшается. В результате аппроксимации экспериментальных данных получена зависимость вида  $\tau_{ind} = a T_q^e$ .



**Рис. 2.** Кадры видеogramм опыта зажигания мазута сферической частицей: 1) мазут; 2) металлическая частица; 3) пары легких фракций мазута; 4) стеклянный сосуд; 5) пламя



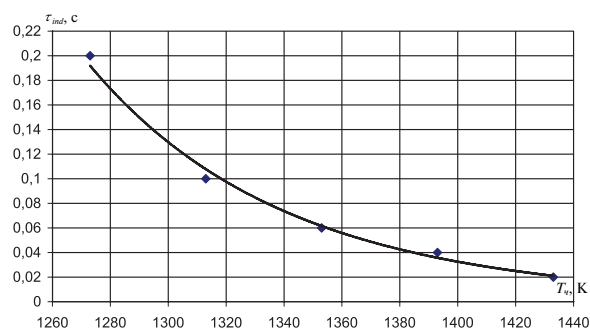
**Рис. 3.** Кадр видеogramмы опыта (отсутствие зажигания мазута сферической частицей): 1) мазут; 2) металлическая частица; 3) пары мазута; 4) стеклянный сосуд

Во всем охваченном диапазоне изменения температур наименьшие по сравнению с дистиллятными топливами значения времени задержки воспламенения зафиксированы при зажигании мазута. Этот неочевидный на первый взгляд результат скорее всего обусловлен особенностями процессов образования паров исследованных жидких топлив. Выше отмечалось, что мазут относится к топливам с высокой долей коксового остатка процесса пиролиза (крекинга) исходного вещества. Поэтому на переход из жидкого состояния в состояние, характерное для воспламенения этого топлива, необходимо при прочих адекватных условиях наименьшее количество энергии.

Для частиц, образующихся при сварке, начальная температура зажигания пожароопасного топлива ниже на  $40^\circ$ , чем для частиц правильной формы.

Полученные результаты демонстрируют влияние наличия открытых пор у «горячей» частицы на закономерности зажигания мазута. Механизм этого влияния достаточно сложен и многогранен. Во-первых, следует отметить, что пористая частица

при попадании в жидкое топливо осуществляет его нагрев по поверхности большей площади по сравнению с монолитными частицами. Увеличение количества теплоты, передаваемое в зону испарения горючего через постоянную площадь контакта, приводит к росту величины теплового потока в эту зону. Последнее адекватно увеличению температуры при той же площади контакта частицы с жидким топливом.



**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости времен задержки зажигания мазута от температуры частицы в форме сферы ( $d=6 \cdot 10^{-3}$  м), диска ( $d=6 \cdot 10^{-3}$  м,  $h=3 \cdot 10^{-3}$  м) и образовавшимися после сварке

Но кроме этого, влияет на процесс воспламенения и находящийся в порах воздух. Т. к. частица нагрета до высокой температуры, то газы в порах также имеют повышенную температуру. Её величина, конечно, ниже температуры плавления стали, но, в то же время, существенно выше температуры топлива. Поэтому в приповерхностной пористой структуре создаются условия для локального воспламенения горючего. Скорее всего, это происходит в сечении частицы на границе раздела «жидкость – воздух», хотя возможно воспламенение и в порах затопленной поверхности частицы. Следует отметить, что плотность (реальная) пористых частиц заметно меньше плотности монолитных. Поэтому скорость осаждения пористой частицы в горючем много меньше аналогичной величины для монолитной частицы. Соответственно больше время нагрева топлива частицей.

Полученные экспериментальные зависимости  $\tau_{ind}$  от  $T_{\text{ч}}$  показывают (рис. 4), что для мазута характерен сдвиг (по сравнению с дистиллятными) предельных режимов зажигания в область менее высоких температур. Но при этом в диапазоне изменения  $T_{\text{ч}}$ , соответствующем условию зажигания мазута стальными монолитными частицами, отклонения по  $\tau_{ind}$  нельзя назвать значительными. Вероятно, проявляются свойства мазута, о которых упомянуто выше. Сдвиг предельных режимов зажигания в область меньших температур обусловлен, очевидно, ростом площади контакта поверхности частицы с мазутом и соответствующим увеличением теплового потока в зону испарения. Но, с другой стороны, по этому топливу оценки величин  $\tau_{ind}$  можно достаточно точно проводить по результатам экспериментов со стальными монолитными частицами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1979. – 424 с.
2. Руководство по ремонту арматуры высоких параметров РД 153-34.1-39.603-99. Разработано Открытым акционерным обществом «Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС». – М., 2000. – 31 с.
3. Буров В.Д. Тепловые электрические станции. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 466 с.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

#### Выводы

Экспериментально исследовано зажигание мазута одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей. Исследован механизм зажигания мазута «горячей» частицей. Выявлено, что в случае падения пористой частицы топливо начинает воспламеняться при более низких температурах, поскольку данная частица обладает большей площадью соприкосновения и меньшей скоростью осаждения в горючее. Установлено, что существует высокая вероятность воспламенения мазута при выпадении на его поверхность одиночных нагретых до высоких температур стальных частиц различных форм и структур, образующихся при проведении ремонтных работ в результате сварки или резки металлов.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00366).*

5. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – № 1. – С. 78–85.
6. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» металлической частицей // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 9/2. – С. 90–95.
7. Белосельский Б.С., Соляков В.К. Энергетическое топливо. – М.: Энергия, 1980. – 167 с.

*Поступила 27.10.2008 г.*